

溶剂萃取技术在铌钽分离中的应用研究进展

雷 鑫, 刘呈义, 张浩然, 赵辰宇, 马佳俊

(宁夏东方钽业股份有限公司, 宁夏 石嘴山 753000)

摘要: 铌和钽作为战略性稀有金属, 其高效分离与提纯对资源可持续利用至关重要。概述了铌钽资源特性与工业需求, 重点综述了溶剂萃取法在铌钽分离中的研究进展。探讨了铌钽氟化物配合物的形成机制及其与萃取剂的配位行为, 重点总结了酮类、酯类、胺类、冠醚类、有机磷酸酯类及新型功能化离子液体萃取剂萃取性能, 并指出了当前面临的挑战与发展趋势。

关键词: 铌; 钽; 分离; 溶剂萃取; 萃取剂; 氟配合物; 研究进展

中图分类号: TF804.2; TF841.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2617(2026)03-0284-07

DOI: 10.13355/j.cnki.sfyj.2026.03.002

铌和钽作为重要的稀有金属, 在工业中应用广泛。铌是钢铁工业中重要的微合金化元素, 因能提高钢材的屈服强度、韧性和抗热性, 可用于制备核工业及航空航天领域的超合金; 而钽因具有优异的化学稳定性和介电性能, 广泛用于光学、陶瓷及耐腐蚀结构材料领域。但铌和钽在地壳中丰度较低(Ta 约 2×10^{-6} , Nb 约 2×10^{-5}), 化学性质相似, 且分布不均, 主要集中于巴西、加拿大、澳大利亚、俄罗斯及非洲部分国家, 其中巴西和加拿大的铌资源约占全球储量的 90%^[1]。中国铌钽资源多分布在江西、内蒙古、福建等地, 但矿床规模小、品位低, 且伴生杂质多, 开发利用难度较大, 钽资源供应高度依赖进口^[2-3]。早期采用的 Marignac 结晶法分离铌和钽因效率低、流程复杂已被溶剂萃取工艺完全取代^[4]。溶剂萃取工艺主要是通过氟离子体系使铌钽与氟反应生成配合物, 达到分离铌钽的目的^[5-8]。本文简述了铌、钽来源及分离提纯的工业需求, 重点介绍了溶剂萃取法在铌钽分离中的研究进展, 旨在为开发绿色高效的铌钽分离提纯技术提供参考。

1 铌钽的来源及分离提纯的工业需求

自然界中, 铌、钽通常以类质同象混合物形式存在于钽铁矿、细晶石(如 $(\text{Ca}, \text{Na})_2(\text{Nb}, \text{Ta})_2(\text{O}, \text{OH}, \text{F})_7$ 、

斜长石型铌矿(柯铁矿)及铌钽矿 $(\text{Fe}, \text{Mn})(\text{Nb}, \text{Ta})_2\text{O}_6$)、 $((\text{Fe}, \text{Mn}, \text{Mg})(\text{Nb}, \text{Ta})_2\text{O}_6)$ 等矿物中(表 1)^[9]; 此外, 锡渣、冶金渣及废弃钽制品等二次资源也是铌、钽重要原料来源^[10-11]。

表 1 铌、钽在自然界中的存在形式及含量
Table 1 Existence forms and contents of niobium and tantalum in nature

矿物	结构式	$w(\text{Ta}_2\text{O}_5)/\%$	$w(\text{Nb}_2\text{O}_5)/\%$
钽铁矿	$(\text{Fe}, \text{Mn})(\text{Ta}, \text{Nb})_2\text{O}_6$	40~80	2~30
柯铁矿	$(\text{Fe}, \text{Mn})(\text{Ta}, \text{Nb})_2\text{O}_6$	1~40	30~75
锡锰钽矿	$(\text{Ta}, \text{Nb}, \text{Sn}, \text{Mn}, \text{Nb}, \text{Fe}, \text{Ti})_{16}\text{O}_{32}$	45~70	1~15
细晶石	$(\text{Ca}, \text{Na})_2(\text{Ta}, \text{Nb})_2(\text{O}, \text{OH}, \text{F})_7$	50~79	1~10
黑稀金矿	$(\text{Y}, \text{Ca}, \text{Ce}, \text{U}, \text{Th})(\text{Ta}, \text{Nb}, \text{Ti})_2\text{O}_6$	2~12	22~30
铌钽矿	$(\text{Fe}, \text{Ca}, \text{U}, \text{Y}, \text{Ce})_2(\text{Nb}, \text{Ta})_2\text{O}_6$	15~30	40~55

铌和钽同属元素周期表第 VB 族元素, 原子半径接近, 物理化学性质极为相似。二者均具有熔点高、塑性良好、导电导热性及化学稳定性优良、金属表面形成的氧化膜介电常数大等特点。此外, 铌还

收稿日期: 2025-11-22; 修订日期: 2026-01-18

基金项目: 宁夏回族自治区中央引导地方科技发展专项项目(2024FRD05063)。

第一作者简介: 雷鑫(1996—), 男, 硕士研究生, 技术员, 主要研究方向为复杂钽铌资源提取。

具有低热中子俘获截面、抗腐蚀及超导性能。在化学性质方面,铌和钽在水溶液中均以+5价形式稳定存在,且易发生水解形成胶体,为使它们形成稳定的氟配合物(如 $\text{NbOF}_5^{2-}/\text{NbF}_6^-$ 和 $\text{TaF}_7^{2-}/\text{TaF}_6^-$ [12], 其具体形态依赖溶液酸度),必须在有氟离子存在条件下进行。目前,针对铌钽分离提纯的研究主要集中在开发高效且经济的萃取工艺方面,特别是针对低浓度、低品位原料。

2 溶剂萃取技术分离铌钽发展现状

2.1 溶剂萃取原理及流程

溶剂萃取法是基于目标金属离子与特定配体形成溶于有机相的配合物,实现铌钽分离。铌和钽在水溶液中极不稳定,易发生水解并形成多种配合物(图 1)。在高浓度盐酸和硫酸混合溶液中,铌和钽也会与 Cl^- 形成配合物。如 Nb 在浓盐酸溶液中会形成 $\text{Nb}(\text{OH})_2\text{Cl}_4^-$,当盐酸浓度降至 12 mol/L 时,转化为 $\text{Nb}(\text{OH})_2\text{Cl}_3^-$;进一步降至 3 mol/L 时,配合物稳定性较差,易水解而形成胶体沉淀物 [13-14]。Ta 稳定性较强,反应性相比铌较弱,因此 Ta 在盐酸溶液中主要存在形式为 TaCl_6^- 。而在含氟的酸性介质中,铌及钽通常会形成 NbOF_5^{2-} 、 NbF_6^- 和 TaF_7^{2-} 、 TaF_6^- 等阴离子配合物,这些氟配合物的性质相对稳定。如在 Nb-HF-H₂O 体系中,当 HF 浓度较低时, NbOF_5^{2-} 占主导地位,当 HF 浓度升至 35% 以上时, NbF_6^- 会转化为 NbF_6^- ,反应如式(1)所示 [15];在 Ta₂O₅-HF-H₂O 体系中,当 HF 浓度较低时, TaF_7^{2-} 占主导,当 HF 浓度较高时, TaF_7^{2-} 会转化为 TaF_6^- ,反应如式(2)所示。

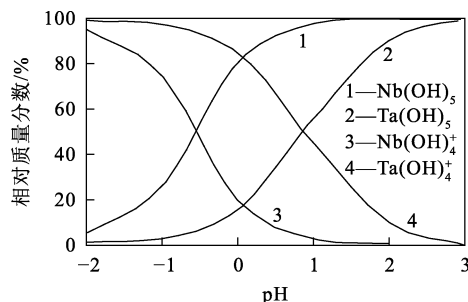


图 1 钽、铌在酸性溶液中的水解情况 [9]

Fig. 1 Hydrolysis of tantalum and niobium in acidic solutions [9]

配合物的性质与组成随氟浓度变化而变化是萃取反应的基础 [16-17]。虽然氟体系会造成环境污染,但在无氟化物条件下,纯净铌钽产品极难回收,因此,目前该技术通常都在有氟离子存在条件下进行,常采用氢氟酸与硫酸(或盐酸)混合酸体系对原料进行浸出,通过将铌钽转化为铌钽氟配合物,再利用有机萃取剂实现分离提纯 [9]。在溶剂萃取过程中,铌、钽与萃取剂形成的金属配合物的种类、组成及稳定性对铌和钽的萃取率和分离选择性会产生直接影响。在典型工业化工工艺流程中,先将原料进行选矿和机械细碎,再通过热处理(如硫酸烧结、氢氧化钠碱性焙烧等)改变矿物形态,然后利用酸浸将 Nb 和 Ta 浸出,浸出率一般可达 80% 以上 [18]。浸出后的溶液通过溶剂萃取实现分离纯化,工业上普遍采用基于氟离子形成的配合物进行分离,所用萃取剂以 MIBK 最为典型。MIBK 生产纯铌和钽产品的工艺流程如图 2 所示。

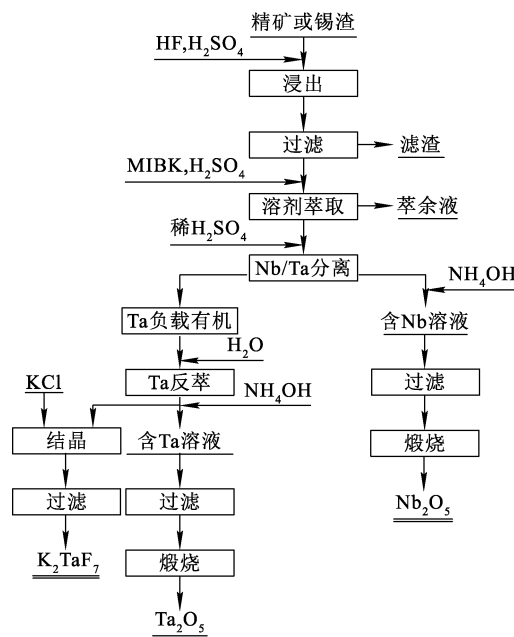


图 2 用 MIBK 生产纯铌和钽产品的工艺流程 [9]

Fig. 2 Process flowchart for producing pure niobium and tantalum products using MIBK [9]

2.2 主要萃取剂及其性能对比

工业上萃取分离铌和钽时,常用的萃取剂主要有酮类、酯类、胺类、冠醚类、有机磷酸酯类萃取剂等,此外还有一些新型功能化离子液体萃取剂。

2.2.1 酮类萃取剂

甲基异丁基酮(MIBK)是一种常用的中性萃取剂,在氢氟酸体系中,该萃取能通过溶剂化机制萃取钽铌氟配合物。具体而言,以 MIBK 作为萃取剂时,钽和铌主要以 H_2NbF_7 和 H_2TaF_7 配合物形式被萃取到有机相中。

MIBK 在低浓度 HF 体系中可有效分离钽铌,因此在酸性条件选择方面,以 HF- H_2SO_4 混合酸体系效果更佳。Zhu Z. W. 等^[9]研究了在 3 mol/L HF 和 2 mol/L H_2SO_4 体系中萃取分离钽铌,结果表明,钽萃取率可达 99%,而铌几乎不被萃取,说明在低硫酸浓度下,钽萃取率较高,而铌萃取率较低,这是因为硫酸浓度会通过“盐析作用”对萃取平衡产生影响,进而使钽和铌的萃取率出现差异,从而实现二者的初步分离。MIBK 在低浓度 HF 体系中还具有较强的杂质去除能力。如徐娟^[19]研究了在 HF 浓度为 0.5 mol/L 条件下萃取钽铌,结果表明,Fe、Si、Al、Ti 等杂质基本不会进入含钽有机相,之后用 3 mol/L H_2SO_4 洗涤 2 次可完全去除有机相中的微量铌杂质,获得高纯钽产品。由于 MIBK 对盐酸、硫酸等无机酸的萃取作用较弱,能避免杂质酸进入有机相,从而提高分离选择性。杨秀丽等^[20]研究表明,在氢氟酸初始浓度 0.5 mol/L、钽铌总质量浓度 60 g/L、萃取相比(V_O/V_A)为 5 条件下,仅需 5 min 即可达到萃取平衡,钽、铌单级萃取率分别达 96.01% 和 0.048%,钽铌分离系数接近 50 000。温度对萃取过程有显著影响,MIBK 萃取钽为放热过程,降低温度有助于提高钽的分配比。

MIBK 具有密度低、黏度低、化学稳定性良好等优点,作为钽铌分离萃取剂时,萃取速度快(平衡时间约 1 min),操作简便,成本较低^[9],其对钽和铌的饱和萃取容量较高,能满足工业生产对负载能力的需求^[21]。但该萃取剂存在水溶解度较大(体积比约 2%)、闪点低(27 °C)及挥发性强等缺点,试剂损耗量较大,同时还可能带来操作安全风险。MIBK 虽存在一些缺点,但因综合性能相对较优,特别是在低浓度氢氟酸体系中,通过优化 HF 浓度、相比及温度等,可实现钽铌的高效分离,能为低氟污染、高纯度钽铌产品的制备提供良好的应用前景,因此仍是目前最常用的钽铌分离萃取剂。

2.2.2 酯类萃取剂

磷酸三丁酯(TBP)是酯类萃取剂的典型代

表,其磷酰基氧通过 P—O—M 配位键与钽铌氟配合物结合。相比 MIBK 体系,TBP 具有更强的耐酸腐蚀性,适用于高温高压操作条件,且萃取容量更高。此外,TBP 因具有较强的碱性,能在较低相比(V_O/V_A)下进行萃取,有助于减少工艺溶液流量,降低钽、铌杂质共萃取率。但该体系在实现钽与铌的有效分离方面存在一定难度,其萃取顺序为钽>铌>钽。其中,铌的萃取受氟浓度和相比(V_O/V_A)的影响较小,而钽的萃取受相比(V_O/V_A)影响较大^[21]。针对上述问题,研究人员提出了在 TBP 中加入仲辛醇,通过形成协同萃取效应,提高萃取分离效果^[22]。

TBP-仲辛醇混合萃取剂体系通过调节酸浓度和相比(V_O/V_A)等条件实现钽、铌的高效提取和分离,尤其对含低浓度钽、铌和钨的钽铌矿萃余液具有明显的协同萃取效果。钟岳联等^[23]研究了用 TBP-仲辛醇协同萃取钽铌萃余液中低浓度钽、铌,结果表明:在 TBP 与仲辛醇体积比为 1:1、稀释剂体积分数 20%、 H^+ 浓度 16 mol/L、相比(V_O/V_A)为 2/1、温度 25 °C、萃取时间 4 min 优化条件下,钽、铌总回收率可达 98.53%,高于单独使用 TBP 或仲辛醇时的回收率;TBP 作为主萃取剂,因其酯基中氧的偶极矩较大,使其在强酸环境中能高效生成有机盐离子,从而提高萃取性能;而仲辛醇作为协萃剂和部分稀释剂,不仅能助力 TBP 萃取,还能降低有机相密度,促进两相快速分离;该混合体系的萃取机制主要是有机盐萃取,同时伴有部分水合-溶剂化形式的萃取,其中铌的萃取对酸度特别是氢氟酸浓度要求更高,要求氢氟酸浓度超过 4 mol/L 才能达到满意的提取效果。

TBP-仲辛醇混合萃取剂体系在分离钽铌方面具有明显优势,可较好地平衡分相时间与回收率关系,萃取分离效果也优于单独使用 TBP 或仲辛醇时的效果。其局限性在于选择性稍弱于 MIBK,且需严格控制氟离子浓度以避免萃取剂降解。

2.2.3 胺类萃取剂

胺类萃取剂在低 HF 浓度或无 HF 体系中萃取钽铌的性能及优化研究已取得了一定进展。DOAA(*N,N*-二仲辛基乙酰胺)和 MOAA(*N*-单仲辛基乙酰胺)作为常见的胺类萃取剂,在低 HF 浓度或 HF- H_2SO_4 体系中对钽铌进行萃取分离时,金属主要以氟络酸形式进入有机相,萃取配合

物的组成接近 $n(\text{H}^+) : n(\text{M}) : n(\text{F}^-) = 1 : 1 : 6$ (M 代表金属离子), 主要存在形式为 $\text{HMF}_6 \cdot n\text{S}$ (S 为 DOAA 或 MOAA, $n = 1 \sim 3$), 也可能有少量的 $\text{HMF}_7 \cdot n\text{S}$ 。水相中 HF 和 H_2SO_4 浓度对萃取性能影响显著: DOAA 萃取铌钽的分配系数随 HF 浓度升高而增大, 且对硫酸浓度变化较为敏感, 当硫酸浓度升高时, 分配系数会急剧上升; 而 MOAA 在高硫酸浓度条件下会大量萃取 H_2SO_4 , 导致铌钽萃取分配系数先升高后降低(出现峰值), 这表明 MOAA 萃取体系受硫酸浓度影响更为显著。红外光谱分析表明, DOAA 和 MOAA 与金属配位过程中存在两种主要配位模式: 一是通过羰基氧原子进行的单氧配位, 二是氧氮双配位(即氮原子与氧原子共同参与配位)。其中, MOAA 因分子结构空间位阻较小, 更易形成含氮配位的双配位结构, 这种结构使其在高酸度条件下的萃取性能提升更显著。此外, 二者的萃取配合物在溶剂化行为上也存在差异: DOAA 倾向于形成 1~2 个溶剂分子的溶剂化物, 主要通过单氧配位或简单配位结构实现萃取; 而 MOAA 常形成 2~3 个溶剂分子的溶剂化物, 其氮参与配位的复合结构赋予其更优的萃取性能和更广的适用范围^[24]。

目前, 对胺类萃取剂在含 HF 体系中的应用研究较多, 仅有少数研究人员研究了极低 HF 浓度或无 HF 体系下胺类萃取剂对铌钽的萃取性能。如梁泽根等^[25]研究了在 11.3 mol/L 盐酸溶液中加入二辛胺(DOA)萃取铌钽, 结果表明: 适宜条件下, 铌萃取率约为 85%, 高于单独使用二辛胺(DOA)的 57%; 该体系中, 铌以阴离子氯化物配合物形式存在, DOA 与铌配合物的配比约为 2, 二者形成了稳定的双电荷配合物配位; 钽萃取率仅约 0.5%, 几乎不被萃取, 说明 DOA 在无氟条件下也可有效分离铌与钽。Masloboev 等^[8]研究了在有机相中添加正己醇萃取分离铌钽, 结果表明, 添加正己醇可显著促进铌的萃取, 使铌的分配系数从 1.3 提升至 12, 从而降低对胺的需求; 从铌钽混合溶液中二次萃取, 铌回收率约为 83%, 而钽萃取杂质仅为 3.5%~4.0%, 该萃取体系对铌和钽的分离效果也较好。

综上, 胺类萃取剂对铌钽的选择性分离潜力较大, 因此关于胺类萃取剂在低 HF 或无 HF 体系中应用研究具有一定价值, 有望成为重要探索

方向^[8]。

2.2.4 冠醚类萃取剂

二苯并-18-冠-6(DB_{18}C_6)是冠醚类萃取剂的典型代表, 其空腔结构可特异性识别钽(V)离子。Masloboeva^[8]研究表明, 在萃取钽过程中, 钽(V)在 4 mol/L 盐酸溶液中以 TaF_5 形式, 与 DB_{18}C_6 形成钽/ DB_{18}C_6 化学计量数比为 1/1 的 $[\text{TaOCl}_3][\text{L}]$ 配合物, 并与硫氰酸根以化学计量数比 1/3 结合形成 $[\text{TaOCl}_2(\text{SCN})_3]^{2-}[\text{LK}^+]_2$ 配合物, 萃取平衡常数由配合物和游离物种的浓度关系决定, 且萃取反应 5 min 即可达到定量萃取。

冠醚体系的选择性极高, 但合成成本高昂, 且对溶液酸度敏感, 目前多用于实验室规模的高纯钽制备。

2.2.5 有机磷酸酯类萃取体系

有机磷酸酯类萃取体系也可用于萃取分离铌钽。Kamio 等^[26]研究了在含有机磷酸酯(如 EH-PNA)的微胶囊萃取模型中萃取铌钽, 金属离子被萃取至该微胶囊的机制包括 3 个阶段: 第 1 阶段, 金属离子扩散穿过水相薄膜至微胶囊表面; 第 2 阶段, 金属离子与萃取剂在微胶囊表面反应形成配合物; 第 3 阶段, 形成的配合物通过微胶囊孔隙向内部扩散, 其中化学反应原理为金属离子与萃取剂先形成中间配合物(化学计量数比 1/1), 随后中间配合物与自由萃取剂反应生成中性配合物, 该配合物因无电荷可迅速扩散进入微胶囊内部。

微胶囊体系具有选择性高、萃取剂损耗低的优点, 但微胶囊制备工艺复杂, 目前尚处于研究阶段。

2.2.6 新型功能化离子液体萃取剂

功能化离子液体因具有结构可设计性和优异性能而备受关注。近年来, 研究人员合成了一系列磷酸酯功能化的特定任务专用离子液体(TSILs), 并通过在多种阳离子中引入磷酸酯基团, 模拟 TBP 的磷酸基功能, 实现钽的选择性萃取与分离。其中, Micheau 等^[27]研究的带有乙基哌啶铵阳离子的 $[\text{Pip2Phosp}]\text{NTf}_2$ 表现最为突出, 该萃取剂在硫酸介质中对钽具有极高的分离系数, 且对钽/铌及 Fe、Ni、Ag、Mn 等竞争离子的分离系数通常大于 100, 具有高度的选择性; 机制研究表明, 其萃取过程可能涉及离子对配合和离

子交换机制的组合;该 TSILs 体系具有良好的环保优势和回收利用潜力,钽的回收可通过水洗脱实现,[Pip2Phosp]NTf₂ 在多个萃取-洗脱循环中均表现出稳定高效的萃取能力,钽萃取率约为 98%;同时,水和酸可部分溶入有机相,但不会对萃取率造成明显影响,且有机相损失量在循环中逐步下降,具有良好的稳定性和循环使用性。Turgis 等^[28]研究了[EPipMIBK]NTf₂ 从硫酸介质中萃取钽,结果表明,这类含酮 TSILs 在较高硫酸浓度(3~9 mol/L)下对钽具有较高的分配比和萃取率(最高约 98%),同时对铌及 Fe、Ni、Mn、Ag 等竞争离子具有良好的选择性,分离系数达 30~1 400,且具有良好的可回收性,经多次萃取-剥离循环后,萃取效率基本不变,符合绿色化工理念。

功能化离子液体具有不可燃、不挥发、热稳定性好等优点,在萃取分离铌钽方面萃取效率高,选择性好,环境友好,可设计性强,但也存在成本较高、毒性尚不明确、分离过程可能较困难等不足,还有待进一步研究。

3 面临的挑战与发展趋势

当前,铌钽溶剂萃取工艺面临的挑战与发展趋势主要集中在萃取剂设计与机制研究、工艺集成及循环经济构建等方面。

在萃取剂设计与机制研究方面,现有传统有机萃取剂(如 MIBK、TBP、2-OCL)及离子型萃取剂各有优缺点,其与酸介质的配合对铌钽选择性分离及回收率至关重要,因此未来需重点开发更高效、环保的萃取剂体系;而通过对 MIBK 萃取钽的机制研究(确定为溶剂化萃取,萃合物组成为 HTaF₆·3MIBK),可为新型萃取剂的作用机制阐释提供参考,提示未来需结合分子设计深入揭示萃取剂与铌钽物种的相互作用规律,以提升分离选择性^[20]。

在工艺集成方面,以高浓度氢氟酸(HF)为核心介质的铌钽萃取工艺等代表的传统氟化物基方法,因其固有的环境危害与安全风险,已成为制约行业可持续发展的瓶颈,因此,研究人员开展了无氟体系的萃取剂筛选和替代工艺的探索研究。萃取剂的筛选结果表明,酸性萃取剂(如 DEHPA 和 DOMPA)提取效率较高,但由于铌钽水相阳离子物种不稳定且选择性有限,工业应用受限,相比

之下,中性萃取剂(TBP、2-辛醇等)在提高铌钽分离选择性方面更具优势。替代工艺研究方面也取得了一定进展,如采用硫酸、氢氧化钠及盐类(如 KHSO₄、Na₂SO₄)与铌钽矿物或炉渣的热处理联合工艺可显著降低试剂消耗与能耗,同时优化预处理(如粒度细磨、焙烧)与浸出参数的耦合;中国科学院过程研究所提出的无毒无害碱金属亚熔盐法可通过低浓度氢氟酸体系实现铌钽萃取分离,其 KOH 亚熔盐介质可循环使用,且亚熔盐的高反应活性、低蒸汽压等特性有利于提升工艺集成效率^[20],未来需进一步解决替代工艺的规模化能耗控制及各单元操作的协同优化问题。

在循环经济构建方面,核心挑战在于资源供给结构的转变:随着初级资源日趋枯竭,开发基于钛渣、锡渣等二次资源的铌钽回收技术至关重要,溶剂萃取技术需适应复杂废料基质的特性以提高资源再利用率;亚熔盐工艺通过介质循环减少氟污染的实践,为绿色可持续发展提供了思路,未来需重点提升复杂废料中铌钽与共存杂质的分离效率,实现资源高效循环与环境负荷降低的双重目标。此外,减少氟离子使用仍是工艺优化的重要方向,替代传统高浓度氢氟酸体系(如采用硫酸体系或低浓度氢氟酸亚熔盐体系)可显著缓解氟污染,但需平衡分离效率与试剂成本,推动清洁工艺的工业化应用。

4 结语

目前,溶剂萃取技术仍是铌钽分离提纯的主流工艺,具有工艺成熟、分离效果好的优点。以 MIBK 萃取剂为代表的传统氟化体系在工业中应用广泛,而 TBP/仲辛醇混合体系、胺类、冠醚类、有机磷酸酯类萃取剂及功能化离子液体则分别在高酸适应性、低氟萃取与绿色化转型方面具有独特优势与潜力。但现有技术,尤其是主流的浓酸高氟体系,面临着严重的环境挑战与安全隐患。建议下一步研究的重点聚焦于绿色低氟/无氟萃取剂的分子设计、多级工艺参数的精准优化,以及面向低品位复杂资源的预处理-萃取集成技术的创新。通过推动技术向清洁、高效、低耗方向转型,将是实现铌钽资源可持续利用的关键所在。

参考文献:

- [1] POLYAKOV E G, POLYAKOVA L P. Current trends in

- the production of tantalum and niobium[J]. *Metallurgist*, 2003, 47 (1): 33-41.
- [2] 余天桃. 父女元素: 钽和铌[J]. *化学世界*, 2003(3): 168.
YU Tianyao. Father-daughter elements: niobium and tantalum[J]. *Chemical World*, 2003(3): 168.
- [3] 涂春根. 钽、铌资源的分布与原料的供需状况[J]. *稀有金属快报*, 2004, 23(12): 10-12.
TU Chungen. Distribution of tantalum and niobium resources and the supply and demand situation of raw materials[J]. *Rare Metals Letters*, 2004, 23(12): 10-12.
- [4] NETE M, PURCELL W, NEL J T. Separation and isolation of tantalum and niobium from tantalite using solvent extraction and ion exchange[J]. *Hydrometallurgy*, 2014, 149: 31-40.
- [5] 任卿, 张锦柱, 赵春红. 钽、铌资源现状及其分离方法研究进展[J]. *湿法冶金*, 2006, 25(2): 65-69.
REN Qing, ZHANG Jinzhu, ZHAO Chunhong. Current status of tantalum and niobium resources and research progress in separation methods[J]. *Hydrometallurgy of China*, 2006, 25(2): 65-69.
- [6] 刘建迪, 王静静, 李伟, 等. 钽的提取研究进展[J]. *矿产保护与利用*, 2021, 41(2): 163-173.
LIU Jiandi, WANG Jingjing, LI Wei, et al. Research progress in tantalum extraction[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2021, 41(2): 163-173.
- [7] LEE N. A review on the separation of niobium and tantalum by solvent extraction[J]. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2019, 40(4): 265-277.
- [8] MASLOBOEVA S M, ARUTYUNYAN L G, PALATNIKOV M N, et al. Separation and purification of tantalum from plum-bomicrolite of amazonite deposit in Kola Peninsula by acid leaching and solvent extraction[J]. *Journal of Central South University*, 2021, 28(1): 72-88.
- [9] ZHU Z W, CHENG C Y. Solvent extraction technology for the separation and purification of niobium and tantalum: a review[J]. *Hydrometallurgy*, 2010, 107(1): 1-12.
- [10] ROETHE G. Processing of tantalum and niobium ores [C]//Society for Geology Applied to Mineral Deposits. Lanthanides, tantalum and niobium: mineralogy, geochemistry, characteristics of primary ore deposits, prospecting, processing and applications proceedings. Heidelberg: Springer, 1989: 331-341.
- [11] ALBRECHT W W. Production, properties and application of tantalum, niobium and their compounds[C]//Society for Geology Applied to Mineral Deposits. Lanthanides, tantalum and niobium: mineralogy, geochemistry, characteristics of primary ore deposits, prospecting, processing and applications Proceedings. Heidelberg: Springer, 1989: 345-358.
- [12] AGULYANSKY A. Chemistry of tantalum and niobium fluoride compounds[M]. Amsterdam: Elsevier, 2004.
- [13] PALILLA F C, ADLER N, HISKEY C F. Analytical chemistry of niobium and tantalum[J]. *Analytical Chemistry*, 2002, 25(6): 926-931.
- [14] KANZELMEYER J H, RYAN J, FREUND H. The nature of niobium (V) in hydrochloric acid solution[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1956, 78 (13): 3020-3023.
- [15] PACKER K J, MUETTERTIES E L. Nature of niobium(V) fluoride species in solution[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1963, 85(19): 3035-3036.
- [16] VARGA L P, WAKLEY W D, NICHOLSON L S, et al. Solvent extracting studies of tantalum fluoride complexes with *N*-Benzoylphenylhydroxylamine, tri-*n*-octylphosphine oxide and methyl isobutyl ketone using computer techniques[J]. *Analytical Chemistry*, 2002, 37(8): 1003-1009.
- [17] CALETKA R, HAUSBECK R, KRIVAN V. Distribution of niobium and tantalum on DOWEX-1 and polyurethane form in HF-H₂SO₄ and HF-HCl medium[J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 1989, 131 (2): 343-352.
- [18] MACHACA D M C, CARVALHO T C D, TENORIO J A S, et al. Advancements in the extraction of niobium and tantalum: innovative strategies in hydrometallurgical processes[J]. *Minerals Engineering*, 2025, 222: 109125.
- [19] 徐娟. 低浓度氢氟酸体系中 MIBK 萃取分离铌钽工艺的基础研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2010.
- [20] 杨秀丽, 王晓辉, 孙青, 等. 低浓度氢氟酸体系中 MIBK 萃取分离钽铌的研究[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2012(11): 26-29.
YANG Xiuli, WANG Xiaohui, SUN Qing, et al. Study on separation of tantalum and niobium by extraction with mibk from low hydrofluoric acid concentration system[J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2012 (11): 26-29.
- [21] MAIOROV V G, KIRICHENKO N V, ELIZAROVA I R, et al. Extraction of tantalum, niobium, and antimony fluorides[J]. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2013, 47(4): 480-483.
- [22] 郑清远, 罗重庆. 仲辛醇-甲庚酮混合萃取剂自 HF-H₂SO₄ 溶液中协同萃取钽(V)、铌(V)的研究[J]. *稀有金属*, 1981(1): 22-27.
ZHENG Qingyuan, LUO Chongqing. Study on the synergistic extraction of tantalum(V) and niobium(V) from HF-H₂SO₄ solution using a mixed extractant of sec-octanol and methyl heptanone[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 1981(1): 22-27.
- [23] 钟岳联, 邓朝勇, 石波, 等. TBP-仲辛醇协同萃取钽铌萃余液中低浓度钽、铌和钨[J]. *中国有色金属学报*, 2021, 31 (3): 775-784.
ZHONG Yuelian, DENG Chaoyong, SHI Bo, et al. Synergistic solvent extraction of Ta/Nb/W from Ta/Nb extraction raffinate by using TBP and 2-octanol as extractants

- [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31 (3): 775-784.
- [24] 李树森, 袁承业. N-取代酰胺萃取铌、钽的机理[J]. 化学学报, 1975(1): 11-22.
- LI Shuseng, YUAN Chengye. Extraction of niobium and tantalum by N-substituted amides[J]. Acta Chimica Sinica, 1975(1): 11-22.
- [25] АЛИМАРНИ И П, 梁泽根. 用胺类从盐酸溶液中萃取铌与钽[J]. 稀土与铌, 1974(3): 87-91.
- АЛИМАРНИ И П, LIANG Zegen. Extraction of niobium and tantalum from hydrochloric acid solutions using amines[J]. Chines Rare Earths, 1974(3): 87-91.
- [26] KAMIO E, MATSUMOTO M, KONDO K. Theoretical development of metal extraction mechanism into an extractant-impregnated microcapsule[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2007, 46(1): 255-265.
- [27] MICHEAU C, LEJEUNE M, ARRACHART G, et al. Recovery of tantalum from synthetic sulfuric leach solutions by solvent extraction with phosphonate functionalized ionic liquids[J]. Hydrometallurgy, 2019, 189: 105107.
- [28] TURGIS R, ARRACHART G, MICHEL S, et al. Ketone functionalized task specific ionic liquids for selective tantalum extraction[J]. Separation and Purification Technology, 2018, 196: 174-182.

Research Progress on Solvent Extraction Technology in Niobium-Tantalum Separation

LEI Xin, LIU Chengyi, ZHANG Haoran, ZHAO Chenyu, MA Jiajun

(Ningxia Orient Tantalum Industry Co., Ltd., Shizuishan 753000, China)

Abstract: Niobium and tantalum are strategic rare metals, and their efficient separation and purification are crucial for the sustainable utilization of resources. The resource characteristics and industrial demand of niobium and tantalum are summarized, and the research progress of solvent extraction method in niobium and tantalum separation is focused on. The formation mechanism of niobium-tantalum fluoride complexes and their coordination behavior with extractants are discussed. The extraction performance of ketones, esters, amines, crown ethers, organic phosphonates, and novel functionalized ionic liquid extractants is summarized, and current challenges and development trends are outlined.

Key words: niobium; tantalum; separation; solvent extraction; extractant; fluorine complex; research progress